

高阻尼橡胶支座水平剪切性能研究综述

许世超

西藏大学

DOI:10.12238/pe.v3i1.11399

[摘要] 高阻尼橡胶支座是一种新型的耗能型隔震支座,可有效保护上部建筑结构,避免地震对建筑造成严重破坏。水平等效刚度、等效阻尼比、剪切刚度等水平剪切性能是衡量高阻尼橡胶支座隔震性能和耗能能力的重要力学性能参数,国内外诸多学者对此展开了广泛的研究。本文梳理了国内外对高阻尼橡胶支座水平剪切性能相关影响因素的研究,主要影响因素为:剪应变幅值、压应力、温度和频率,并对各影响因素相关性强弱进行了比较,最后进行了总结和分析。

[关键词] 高阻尼橡胶支座; 水平等效刚度; 等效阻尼比

中图分类号: F767.5 **文献标识码:** A

study on horizontal shear performance of high damping rubber bearings:a review

Shichao Xu

Tibet University

[Abstract] A high-damping rubber bearing is a new type of energy-absorbing seismic isolation bearing that can effectively protect the upper structure of a building from earthquake damage. The horizontal equivalent stiffness, equivalent damping ratio, and shear stiffness are important mechanical performance parameters for evaluating the seismic isolation performance and energy absorption capacity of high-damping rubber bearings. Many scholars have conducted extensive research on this issue at home and abroad. This paper reviews the research on the horizontal shear performance of high-damping rubber bearings, the main influencing factors of which are the strain amplitude, compressive stress, temperature, and frequency, and the relative strength of the correlation between each factor is compared. Finally, a summary and analysis are presented.

[Key words] seismic isolation; high damping rubber bearing ;mechanical property

1 序言

近年来,频发的地震在短短数分钟的时间将人们数年建成的建筑摧毁殆尽,给人们的生产和生活带来巨大危险,隔震技术越来越受到人们的重视。传统的设计方法立足于“抗”,通过增加建筑结构的截面尺寸增加其强度,以避免其在地震中受到破坏。但事与愿违,汶川地震后,大量建筑的破坏揭示这一方法的不可行。目前主要立足于“隔”,即在建筑结构和基础之间建立一个隔震层,隔绝地震能量的向上传递,其核心构件就是高阻尼橡胶支座(High-damping rubber bearing,简称HDRB)。HDRB由钢板和高阻尼橡胶经硫化等工艺制成,在竖直方向,高阻尼橡胶和钢板紧密贴合,协同工作,钢板限制了橡胶受压时竖直方向的变形,有效地提高了HDRB的承载力;水平方向,钢板和橡胶交替排列,橡胶可在水平方向发生剪切变形进行耗能,减少地震能量的向上传递。

相较于传统建筑结构,HDRB的引入保证了竖直方向上的刚

度,承载力基本不变;削弱了水平方向的刚度,使整个建筑结构的变形集中发生在刚度较低的隔震层,保证了上部结构的整体稳定性。因此,开展HDRB的力学试验,对提高其隔震性能具有重要意义。

1.1 剪应变幅值相关性

沈朝勇等^[1]经过反复加载试验,在HDRB水平剪切试验中,进行了25%~250%的剪应变幅值相关性研究。试验结果表明,该HDRB相对较软,在大剪应变下依然没有明显的刚度硬化,随着剪应变的增大,HDRB滞回曲线面积显著增大,而水平等效刚度、等效阻尼比等均保持稳定。

Li等^[2]通过对三个不同尺寸的HDRB(HDRB600、700、800)进行了剪切试验,由于试验设备的限制,仅进行了50%~150%幅值内的试验,各尺寸的HDRB随剪应变的增加表现出相近的趋势;另外,该研究发现,大剪切变形削弱了压应力对HDRB力学性能的影响。

Yun等^[3]对三个同尺寸HDRB进行了剪应变幅值相关性试验,剪应变幅值25%~300%,每个剪应变循环五次。研究发现,HDRB在100%剪应变时发生了软化,当应变超过200%时仅有轻微的硬化,该材质的HDRB具有稳定的滞回曲线;此外,HDRB的剪切模量和水平等效刚度均随幅值的增大而增大,但增大的幅度在不断减小。

Montgomery等^[4]在多伦多大学对HDRB进行了多项试验,在0.2Hz下进行了50%~200%的剪应变试验,与其他学者不同的是,该种材料的HDRB没有出现刚度硬化的现象,滞回曲线呈椭圆形,随着应变幅值的增加,剪切模量呈现先增后减的趋势,这与HDRB的自热有关。

Shen等^[5]对SHDRB(超高阻尼橡胶支座)和LRB(铅芯橡胶支座)进行了系统的试验,归一化处理后,得各剪应变下的趋势,SHDRB的屈服后刚度和等效阻尼比在25%~50%剪应变之间具有明显的剪应变幅值相关性,分别降低了40%和33%,但剪应变超过100%时,相关性显著减弱。Shen认为,SHDRB力学性能的最大影响因素为加载顺序,其次是温度和频率,再次为压应力。

朱昆^[6]对三批HDRB进行了力学性能试验,HDRB尺寸为350*350*137mm,其第二批进行剪切幅值的相关试验,幅值范围15%~270%,处理数据,幅值小于120%时,等效阻尼比稳定在20%~30%之间;但幅值超过120%时,等效阻尼比仅17.4%,较小的剪应变幅值下有更好的阻尼效果。

总结,微观角度下,HDRB的剪切刚度由其组成材料——石墨分子组成的分子链提供,随着剪切变形的进行,分子链逐渐被拉直,HDRB表现出高刚度;剪应变继续增大,部分分子链被拉断,HDRB此刻表现出低刚度;过大的剪应变下,分子链拉直后的韧性为HDRB提供更大的刚度。随着剪应变的增加,HDRB的水平等效刚度、等效阻尼比等均有提升。

2 压应力相关性

薛素铎等^[7]对圆形和方形的橡胶支座进行了压剪试验,压应力依次取6MPa、12MPa、18MPa,随着压应力的增大,该HDRB的水平等效刚度和等效阻尼比均略有增加,水平等效刚度从2.52kN/mm增加至2.85kN/mm,等效阻尼比从18.89%增加至20.34%,幅度很小;此外,该研究发现,圆形支座耗能能力较方形大。

王建强等^[8]通过对若干HDRB200进行了压剪试验,压应力范围3~18MPa,结果表明,随着压应力的增大,其对HDRB水平剪切性能的影响逐渐增大,200%剪应变时,3MPa下耗能1698J,18MPa下耗能3022J,增大约80%,该HDRB具有明显的压应力相关性。

匡成钢等^[9]进行了常规的水平剪切试验,竖向压应力依次取5、8、10、12MPa,分析数据,结果表明,12MPa下等效阻尼比可达40%,而5MPa下仅有12%,HDRB展现出明显的压应力相关性;竖向压缩下,钢板随剪切变形发生转动,增强了对单层橡胶的约束作用。

Oh等^[10]在0~20MPa压应力范围内进行了HDRB剪切试验和频率相关性试验,试验表明,等效阻尼比由15%提升至20%,这主要是石墨分子之间的粘性和摩擦阻尼随压应力增加。

Lu等^[11]将其设计的新型厚层阻尼橡胶支座和普通的HDRB进行了压剪试验,压应力范围为6~15MPa,加载频率0.01Hz。试验结果中,随着压应力的增加,两种橡胶支座的各项的力学性能趋势相同,其中,两者在6~9MPa等效阻尼比相当,但15MPa下新型支座已经提升至21.4%,比普通的HDRB提升效果更显著。

总结,压应力对HDRB性能的影响幅度与HDRB的材料组成有关。过低的压应力会减小橡胶支座受剪时核心受压区面积,进一步削弱其隔震性能的发挥。压应力可以增加HDRB中石墨分子之间的摩擦力,进而提升HDRB的耗能能力。

3 温度相关性

Chen等^[12]发现,在-20℃~40℃之间,HDRB的水平等效刚度、等效阻尼比、滞回曲线面积随温度升高显著下降。温度对HDRB的影响主要包括:循环剪切中,滞后能量引起的HDRB内部温度的升高;HDRB所处环境季节性变化引起的温度起伏。

滕文刚等^[13]通过试验探究了温度对HDRB力学性质的影响,发现在-20℃~0℃之间,随着温度的升高,HDRB发生了软化现象,水平等效刚度有所下降,而在20℃~40℃之间保持性能稳定;等效阻尼比则在整个过程中缓慢下降,即耗能能力减弱,主要原因是橡胶添加剂——石墨随温度升高摩擦耗能降低。

赵爱军^[14]对HDRB、NRB(天然橡胶支座)和LRB进行大温差循环试验,全面探究温度对三种橡胶材料的水平等效刚度、等效阻尼比等力学性能影响,并且采用公式进行了较好的拟合,偏差极小。整体上,邵氏硬度、水平等效刚度、屈服后刚度随着循环时间的增加有明显的增加趋势;而拉伸强度、拉伸伸长率、等效阻尼比随循环时间的增加则呈逐渐下降趋势。随着循环试验的进行,HDRB的等效阻尼比由最初的20.53%逐渐下降,64天后降为18.82%,224天后(试验结束)仅有13.1%。

沈朝勇等^[15]采用拟静力试验方法,系统探究各因素对SHDRB水平性能的影响,其中,在-40℃~-20℃内进行了温度相关性试验,剪应变取100%和175%。试验表明,温度的升高使SHDRB发生了软化,水平等效刚度逐渐下降,但等效阻尼比仅有小范围的起伏,无明显的变化趋势,这主要是因为SHDRB的滞回曲线的面积和水平等效刚度有几乎相同的下降趋势。

总结,HDRB对温度非常敏感,这主要是因为HDRB的补强剂中含有石墨、炭黑等材料,这些材料对温度非常敏感,HDRB在23℃的水平剪切刚度基本是0℃的两倍,而在-20℃,刚度进一步增大,剪切变形十分困难。温度对HDRB的力学性能影响显著,由于橡胶本身散热性能很差,变形耗能过程中很容易引起温度的变化,因此探究剪切变形时,通常尽可能慢地进行,以避免加载速率和温度对其产生干扰。HDRB的使用应考虑当地的气候环境。

4 频率相关性

袁维娜等^[16]测试了不同频率下HDRB的水平性能, 频率范围0.0025~0.05Hz, 在频率增大的过程中, 等效阻尼比由17.7%增加至18.3%, 水平等效刚度由3.85kN/mm提升至4.15kN/mm, 均有提升但增幅均非常小。

Oh等^[17]对HDRB、NRB和LRB三种橡胶进行了系统的力学试验, 在频率相关性试验中, 频率范围0.005~0.7Hz, HDRB和LRB的等效阻尼比在0.1Hz后明显提升, 其中HDRB的等效阻尼比由0.1Hz时的17%提升至0.7Hz时的22%; 三种橡胶支座的水平等效刚度在整个频率范围内有极其微小的提升。

Markou等^[18]进行了0.006~0.500Hz范围内的水平剪切试验, 剪应变为120%和200%, 各频率下的滞回曲线基本重合, 滞回曲线面积略有减小, 他们认为频率对HDRB的水平剪切性能基本没有影响。

陈彦江等^[19]进行了HDRB加载频率相关性试验, 加载频率依次取0.005、0.02、0.025Hz, 结果表明, 等效阻尼比随加载频率的增大由22.52%提升至22.76%, 基本没有变化; 消耗能量由11606J提升至12652J, 增加了9%, 有小幅度的提升, 整体上, HDRB的频率相关性较弱。

Murota等^[20]在进行HDRB尺寸效应研究时, 进行了HDRB频率相关性试验, 频率范围0.01~0.33Hz, 归一化处理, 发现剪切模量随频率增加有所提高, 0.01Hz时的剪切模量仅为0.33Hz时的75%, 属于准静态, HDRB的频率相关性较为明显, 阻尼比和耗散的能量也表现出类似的趋势。

总结, 微观角度下, HDRB耗能主要是其内部石墨分子之间产生摩擦, 频率提升会使石墨分子的振动加剧, 支座摩擦耗能能力增加。在较大的频率范围内, HDRB的水平剪切性能很稳定, 频率相关性很小。

5 结论

HDRB的水平剪切性能是其重要的力学性能, 关乎其隔震能力, 主要受到剪应变幅值、压应力、温度、加载频率的影响:

(1) 剪应变幅值对HDRB水平剪切性能影响最为显著, 剪应变幅值的增加可提升HDRB水平等效刚度、等效阻尼比和滞回曲线面积, 增强HDRB的隔震能力和耗能能力。(2) HDRB水平剪切性能受压应力的影响因橡胶材料而异, 压应力的增加整体上会提升HDRB的水平等效刚度和等效阻尼比, 但是增加的幅度因材料不同会有很大的差异。(3) 过低的温度会使HDRB发生硬化, 不利于变形耗能和隔震, 过高的温度又会使HDRB发生软化, 产生过大的变形, 均不利于HDRB正常工作。HDRB所处温度对其隔震和耗能性能的发挥至关重要。(4) 频率对HDRB的水平性能影响是最小的, 在较大的频率范围内, 其对HDRB的各项性能的影响非常微弱, HDRB具有微弱的频率相关性。(5) 四个影响因素中, 按相关性强弱排序, 剪应变幅值>温度>压应力>频率。

[参考文献]

[1]沈朝勇,周福霖,崔杰,等.高阻尼隔震橡胶支座的相关性试验研究及其参数取值分析[J].地震工程与工程振动,2012,32(06):95-103.

[2]Li等."Hysteretic behavior of high damping rubber bearings under multiaxial excitation".SOIL DYNAMICS AND EARTHQUAKE ENGINEERING,163(2022).

[3]Yun等."Experimental characterization and analytical modeling of a large-capacity high-damping rubber damper".Structural Control and Health Monitoring,25.6(2018).

[4]Montgomery等."Experimental Validation of Viscoelastic Coupling Dampers for Enhanced Dynamic Performance of High-Rise Buildings".JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING,141.5(2015):04014145-04014145.

[5]Shen等."Factors Affecting the Dependency of Shear Strain of LRB and SHDR: Experimental Study".ACTUATORS,10.5(2021):98-98.

[6]朱昆.高阻尼橡胶支座力学性能及其隔震效果分析研究[D].湖北:华中科技大学,2009.

[7]薛素铎,高佳玉,姜春环,等.高阻尼隔震橡胶支座力学性能试验研究[J].建筑结构,2020,50(21):71-75.

[8]王建强,张振洋, and 李政. "高阻尼橡胶支座剪切性能压力相关性试验研究" [J].铁道工程学报,2017,34,(1):47-51,117.

[9]匡成钢. "高阻尼厚层橡胶支座力学性能试验研究" [J].振动工程学报,2024,37,(9):1584-1592.

[10]Oh等."Seismic behavior characteristic of high damping rubber bearing through shaking table test".JOURNAL OF VIBROENGINEERING,18.3(2016):1591-1601.

[11]Lu等."Novel Thick Layer Damping Rubber Bearing (TLDRB) with reduced vertical stiffness: Laboratory tests and mechanical models".JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING,94(2024).

[12]Chen等."Research and Development of High-Performance High-Damping Rubber Materials for High-Damping Rubber Isolation Bearings: A Review".POLYMERS,14.12(2022):2427-2427.

[13]滕文刚,孙红兰, and 王永祥. "橡胶支座性能对比试验及工程应用" [J].筑路机械与施工机械化,2018,35,(4):63-67.

[14]赵爱军. "大温差循环下桥梁隔震橡胶支座力学性能劣化及其隔震效果研究" [J].工程抗震与加固改造,2023,45,(6):25-32,8.

[15]沈朝勇. "超高阻尼隔震橡胶支座力学性能温度相关性影响因素分析" [J].地震研究,2020,43,(3):471-477,601.

[16]袁维娜. "大直径高阻尼隔震橡胶支座力学性能的研究" [J].橡胶工业,2020,67,(5):371-375.

[17]Oh等."Mechanical behavior of seismic isolation bearings in earthquake-induced ultimate limit state".JOURNAL OF VIBROENGINEERING,17.4(2015):1937-1944.

[18]Markou等."Mechanical models for shear behavior in high damping rubber bearings".SOIL DYNAMICS AND EARTHQUAKE ENGINEERING,90.0(2016):221-226.

[19]陈彦江."桥梁高阻尼隔震橡胶支座性能试验研究"[J].

振动与冲击,2015,34,(9):136-140,148.

[20]Murota,Nobuo , and T.Mori . "An Experimental Study on Scale Effect in Dynamic Shear Properties of High-Damping Rubber Bearings." Frontiers in Built Environment(2020).

作者简介：

许世超(1998--),男,汉族,河南省虞城县人,硕士研究生,硕士研究生在读,研究方向：土木工程专业,桥梁与隧道工程方向。